

情報伝播の遅延が グリッドロック発生に及ぼす影響

澤村 悠貴¹・井料 隆雅²・桑原 雅夫³

¹学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: 173t124t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

³正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail:kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

混雑情報の伝播はドライバーの経路選択に影響を及ぼす要因の一つであると考えられる。静的な利用者均衡配分問題では情報がどう伝播しようと最終的には均衡状態に落ち着くことが証明されているため大きな問題とはされていなかった。しかし、グリッドロックのような特殊な混雑下では多少の需要変化であっても流出量が急減する可能性があり、その限りではない。本研究では、グリッドロックになる可能性を持つネットワークについて、情報伝播が交通混雑に対してどのような影響を及ぼすか明らかにする。具体的には、ラウンドアバウトに似た構造を持つ2経路のネットワークを構築し、情報伝播が遅延する場合としない場合の交通挙動をそれぞれ比較し分析を行う。待ち行列の伸びを評価するために交通流はCTMを用いて表現を行う。分析の結果、設定した状況では、情報の遅延があるときのほうがグリッドロックが発生しづらいつことがわかった。

Key Words : information transmission, gridlock

1. はじめに

交通混雑情報をドライバーに伝播させた場合、ドライバーはその情報を受けてより短い旅行時間の経路を選択すると考えられるため、混雑情報の伝播によって交通混雑の特徴は変化すると言えよう。一般的な静的利用者均衡配分問題では、ドライバーがその時点における最短経路を選べると仮定した場合、すなわち経路の混雑情報を事前に知っている場合には、ネットワークは最終的に均衡状態に落ち着くことが証明されているため、大きな問題とされていなかった¹⁾。しかし、動的な利用者均衡配分問題においては微小な需要変化によってネットワークの交通容量が急激に落ちる可能性があることが知られている^{2,3)}。また、災害などの突発的の事象によって発生した交通混雑では混雑情報は事前に十分にいきわたっていないと考えられる。

グリッドロック現象は、災害時などの突発的に需要が高まった際に発生する交通現象として、上記の例に当てはまると言えよう。すなわち、グリッドロック現象においては、混雑情報の伝播によって交通混雑が大きく変化しうる可能性がある。グリッドロック現象は東日本大震災の事例⁴⁾で知られている通り、発生の抑制及び緩和のた

めに、現象を理解した上での最適な制御が必要である。

グリッドロックと経路選択行動や情報提供の関連を分析した研究は少ない。グリッドロックのモデルとしては、Daganzoによるマクロ的モデル⁵⁾が著名であるが、経路選択行動は全く考慮されていない。Mahmassani et al.⁶⁾は経路選択率という面からアプローチを行い、ドライバーに交通混雑の情報を与えたドライバーの割合が多い時にグリッドロックの緩和が見られたと述べており、流入制限によらずとも、交通混雑の情報伝播がグリッドロック緩和に対して影響を及ぼすことが報告されている。一方で、混雑に限らず、選択肢の情報伝播が速すぎる場合には、よりよい選択肢に関する情報がいきわたらずに、それが選択されなくなってしまう可能性があることを示した研究もある⁷⁾。このことは、ドライバーに混雑情報を迅速に与えることが、常に交通混雑を緩和するとは限らないことを示唆する。実際、井料ら⁸⁾は交通流シミュレータを用いて情報伝播の遅延がグリッドロックに及ぼす影響について分析した結果、混雑情報の情報交換速度が速すぎても遅すぎてもグリッドロックに至りやすくなることを示している。このように、交通混雑の情報はグリッドロックに対して緩和効果を持つものの、必ずしも情報を迅速に与えることが効果的ではないことが示されている。

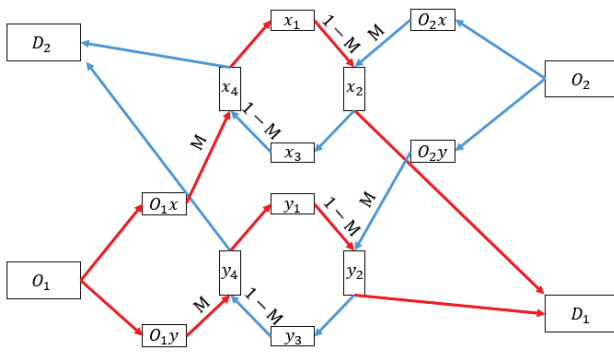


図-1 対象ネットワーク

これらの既往研究は、情報伝播によってドライバーの交通行動を変化させ交通混雑の緩和に対して影響を及ぼす可能性があることを示唆しているが、交通流シミュレータによる数値計算の結果を集計的に分析したにとどまっている。具体的に、どのように情報伝播が交通流に対して影響を及ぼしているか、そのミクロ的な構造はよくわかっていないのが現状である。

本研究では、情報伝播によってドライバーが経路選択を行い混雑回避を行うことができるネットワークを作成し、情報伝播の遅延によって交通混雑が緩和される例の一つを示すことで、情報伝播の遅延が交通混雑を緩和させる可能性を持つということを示すことを目的とする。本稿の構成は以下の通りである。第 1 章で研究の背景と目的を説明した。第 2 章で本研究で用いたネットワークについての条件設定について述べる。第 3 章で結果を示し、第 4 章でまとめと今後の課題を示す。

2. 条件設定

(1) ネットワークの設定

本研究では、Daganzo^{9,10)}が提唱した Cell Transmission Model (以下、CTM) を用いて交通流を記述する。対象ネットワークを図-1 に、CTM の詳細設計を表-1 に示す。OD ペアは(O_1, D_1)、(O_2, D_2)で、それぞれ直進路と迂回路の 2 経路を持つ 2 起点 2 経路のネットワークである。 O_{1x} 、 O_{1y} 、 O_{2x} 、 O_{2y} は経路選択によって割り振られた交通量がすべて流入できるように設けたセルである。そのため、これらのセルはボトルネック容量とジャム台数を無限大に設定している。 x_1 から x_4 、 y_1 から y_4 はラウンドアバウトのような環状構造を表現したセルであり、ドライバーはこのセルを時計回りに通過して流出する。すなわち、 O_1 を起点とする直進路は、まず O_{1y} に向かい、そこから y_4 、 y_1 、 y_2 を通過して D_1 から流出し、 O_1 を起点とする迂回路は、まず O_{1x} に向かい、そこから x_4 、 x_1 、 x_2 を通過して、 D_1 から流出する。

合流部において、流入先が渋滞しており全ての車両が流入できない場合においては、存在する車両数の割合に

表-1 CTM 詳細設定

セル長さ (km)	1
タイムステップ 間隔 (min)	1
q-k 図(※)	

※(ただし、 o_{1x} 、 o_{1y} 、 o_{2x} 、 o_{2y} のセルは BN 容量、ジャム台数ともに無限大に設定)

よらず、車線数や信号などの幾何的条件によって流入割合が一意に定められると考えられる。これを表現したのが合流比 M であり、環に外から流入する車の割合を意味する。今回のネットワークにおいては環 x 、 y に対して環外のセルである O_{1x} 、 O_{1y} 、 O_{2x} 、 O_{2y} からそれぞれ流入できる割合を合流比 M で表す。大島ら¹¹⁾は、この合流比 M の値によってネットワークはグリッドロックに至る可能性があるとして述べている。

経路選択確率 p はそれぞれの経路旅行時間 T (min) を効用としてロジットモデルを用いて算出する。ロジットモデルのパラメータ θ を情報に対する感度を表す変数として用いる。経路旅行時間はセル毎にタイムステップ t (min) 毎の瞬間旅行速度を求めて合計することで毎ステップ毎に算出する。迂回路の経路旅行時間は、これに迂回距離 k (min) を加算する。

情報遅延については、情報遅延がない場合には、前ステップの T を基に p を算出して更新する。情報遅延を与える場合、情報遅延 d (min) の分だけ前のタイムステップの T を参照して p を求める。ただし、 $t < d$ の時は、全て経路旅行時間は自由流旅行時間であるとして経路選択確率を計算する。

今回の分析においては流出量が 1 (台/min) を下回った時点で、ほぼ流出がなくなったものと考えグリッドロックであると判定し計算を打ち切った。タイムステップ数は $t_{max} = 100$ (min)、OD 交通量は $O_1 D_1 = O_2 D_2 = 60$ (台)、迂回距離 $k = 4$ (min) とする。この時、 O_1 を起点とする迂回路の自由流旅行時間 $T_b = 8$ (min)、直進路距離の自由流旅行時間 $T_s = 4$ (min) となる。

(2) グリッドロックネットワーク構造について

本研究で用いるネットワークの環状構造の部分がグリッドロックを引き起こす可能性を持つことについて、ショックウェーブ理論を用いて示す。

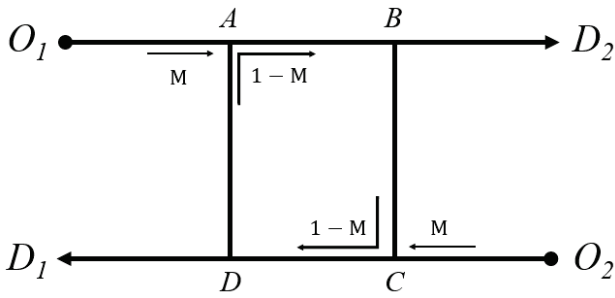


図-2 テストグリッドネットワーク

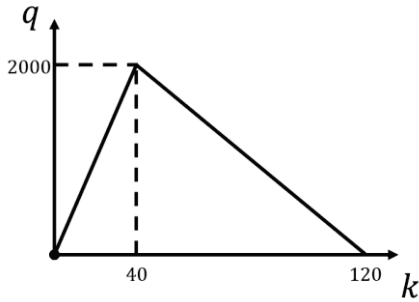


図-3 テストグリッドネットワークの $q-k$ 図

この節での分析対象のネットワークを図-2 に、 $q-k$ 図を図-3 に示す。ODペアは (O_1, D_1) , (O_2, D_2) で、 $q=1500$ (台/h)の交通量を流す。A から D の 4 つのノードを有する。ノード B, D はそれぞれボトルネックとなっており、このノードのボトルネック容量 $\mu=500$ (台/h)とする。O₁ を起点とするドライバーはノード A, B, C, D の順で通過して D₁ から流出し、O₂ を起点とするドライバーはノード C, D, A, B の順で通過して D₂ から流出すると考える。ここで注意しなければならないのは、このネットワークはラウンドアバウト的な構造を持つと仮定するため、例えば O₁ を起点とするドライバーはノード A から直接 D を通って流出することではなく、必ずノード B, C を迂回してから流出するという点である。

対称なネットワークであるため、O₁ を起点とするドライバーのショックウェーブのみに注目して計算する。

a) Step.1

ボトルネック地点 B に到達するまでは、1500 (台/h)の自由流が延伸する。

b) Step.2

ボトルネックに到達すると、BからC方向に $\mu=500$ (台/h)の自由流が延伸し、A方向に $q'=(q-\mu)=1000$ (台/h)の渋滞流が延伸する。

c) Step.3

渋滞流は A まで延伸したら、合流比 M によって下流に延伸する渋滞流の交通量が割り振られる。O₁ 方向には Mq' だけ交通量が割り振られ、D 方向には $(1-M)q'$ だけ交通量が割り振られる。

ここで、 $M=0.5$ とすると、 $(1-M)q'=500$ (台/h)となる。

この時、O₂を起点とするドライバーがボトルネック D を通過する自由流の交通量 $\mu=500$ (台/h)と一致するため、渋滞の延伸はここで止まる。一方で、 $M < 0.5$ の時は、 $(1-M)q' > \mu$ となるため、正のショックウェーブが発生し、渋滞は解消される。また、 $M > 0.5$ の時は、 $(1-M)q' < \mu$ となるため、負のショックウェーブが発生し、渋滞は更に延伸する。延伸したショックウェーブはノード D に到達すると、より混雑した渋滞流が更に下流に伸びていくことになる。延伸した渋滞流は合流部に到達すると、更に混雑した渋滞流が環内に発生し、延伸する。それを繰り返して最終的に交通量は 0 に陥る。

以上により、合流比 M が 0.5 を上回る時にこのネットワークはグリッドロックに向かう可能性があることが示された。また、この現象は同じ形状のネットワークを CTM で構築した場合でも同様に確認されたため、同様の構造をネットワーク内に持つ本研究の対象ネットワークもグリッドロックに至る可能性があると言えるだろう。

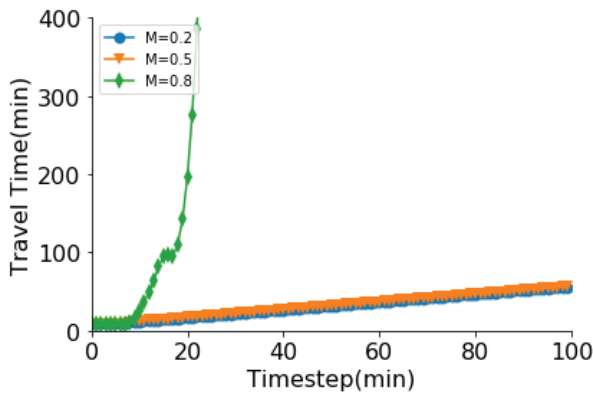
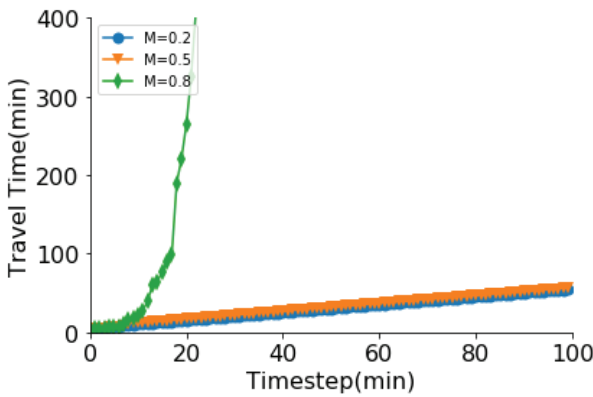
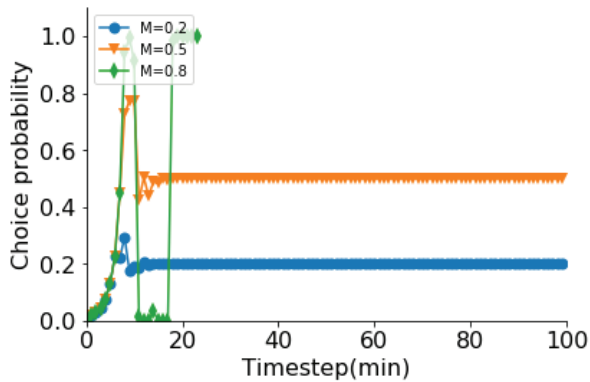
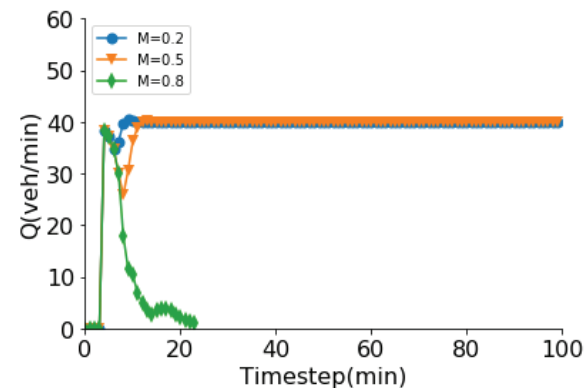
3. 計算結果

本章では、合流比 M 、情報遅延 d 、ロジットモデルのパラメータ θ を変数として交通流の挙動を分析する。分析においては、起点を O₁ とするドライバーについて、迂回路の経路旅行時間 T_b 、直進路の経路旅行時間 T_s 、迂回路選択確率 p_b 、のそれぞれの時系列変化を基にドライバーの選択行動について分析し、環 x からの流出量 Q_x を基にグリッドロック発生の有無を分析する。

(1) 情報伝播がないときの混雑の特性

情報伝播の遅延がないときの現象を確認するために、 $d=0$ 、 $\theta=1.0$ に固定し、 M を変動させた場合のネットワークの変動を観測することで、ネットワークが持つ基礎特性について分析する。 $M=0.2, 0.5, 0.8$ の時の T_b 、 T_s 、 p_b 、 Q_x の計算結果についてそれぞれ図-4、図-5、図-6、図-7 に示す。

図-4、図-5 より、 $M=0.2, 0.5$ の時は T_b 、 T_s とともに単純比例して増加していることが分かる。また、図-6 より、 p_b はそれぞれ $M=0.2$ の時 $p_b=0.2$ 、 $M=0.5$ の時 $p_b=0.5$ に収束し、 $M=0.8$ の時は p_b が振動していることが分かる。更に、図-7 より、 Q_x は 40 (台) にどちらも収束しており、グリッドロックには至らなかったことが分かる。一方で、 $M=0.8$ の時は $t=23$ でグリッドロックが発生したため、計算を打ち切った。なお、 $t_{max}=500$ 、 $M=0.51$ として計算をした結果、 $M=0.8$ の時より緩やかな速度ではあったが流出量は減少してゆき、 $t=407$ でグリッドロックが発生した。

図-4 迂回経路旅行時間 T_b ($\theta = 1, d = 0$)図-5 直進経路旅行時間 T_s ($\theta = 1, d = 0$)図-6 迂回経路選択確率 p_b ($\theta = 1, d = 0$)図-7 環 x からの流出量 Q_x ($\theta = 1, d = 0$)

(2) 情報遅延の影響分析

$M=0.8, \theta=1.0$ に固定し、グリッドロックが起こる環境下において d を変動させた場合のネットワークの変動を観測することで、ネットワークに対して情報遅延が与える影響について分析する。 $d=0, 5, 10, 30, 50$ の時の T_b, T_s, p_b, Q_x の計算結果についてそれぞれ図-8, 図-9, 図-10, 図-11 に示す。

図-8, 図-9, 図-11 より、 d が大きいほど経路旅行時間が急増する時間は遅れ、また流出量が急減に向かう時間も遅れていく傾向があることがわかる。 図-10 を見ると、経路選択確率についても、 d が大きいほど $p_b = 1$ に収束するまでの時間が遅れる傾向があることがわかる。どのパターンでも最終的にはグリッドロックに至った。

(3) 感度分析

$M=0.8, d=0.0$ に固定し、 θ を変動させた場合のネットワークを観測することで、ネットワークに対して情報への感度が与える影響について分析する。 $\theta = 0.5, 1.0$ の時の T_b, T_s, p_b, Q_x の計算結果についてそれぞれ図-12, 図-13, 図-14, 図-15 に示す。 $\theta = 0.5$ の時は $t = 24$ で、 $\theta = 1.0$ の時は $t = 23$ でグリッドロックが発生したため、計算を打ち切った。どの結果を見ても、情報の感度の差によって、 t が小さい時には値に多少の差があるものの、最終的にはどれもほぼ同じ結果に収束していることが分かる。

4. まとめと今後の課題

情報遅延が無い時において、 $M=0.2, 0.5$ の時は T_b, T_s ともに単純比例して増加していることが分かる。今回の設定値では合流部で必ずボトルネック容量を超えた交通需要が流入しようとするためであると考えられ、ゆるやかな経路旅行時間の増加は自然な現象であると言える。また、流出量は最終的に 40 (台) にどちらも収束しており、ネットワークはグリッドロックには至らず、 $M > 0.5$ の時は最終的にネットワークはグリッドロックに至るということが示された。これらの結果は、ネットワークへの流入制限がグリッドロック緩和に対して効果的であると述べた Daganzo²⁾ の結果と一致する。経路選択については、図-6 より合流比が大きいほど迂回路を選択する確率が上がることが示された。 $M=0.5$ の時には、環内と環外の流入割合が等しくなり、本ネットワークが対称性を持つことを考えると、 θ が十分に大きければ Wardrop の原理が働き両経路の旅行時間が等しくなるため $p_b = 0.5$ に収束することは自然であると言える。 $M=0.2$ の時には、環内への流入が難しいために、どちらの経路も同様に環手前のセルで待ち行列が延伸する現象が発生するのでは

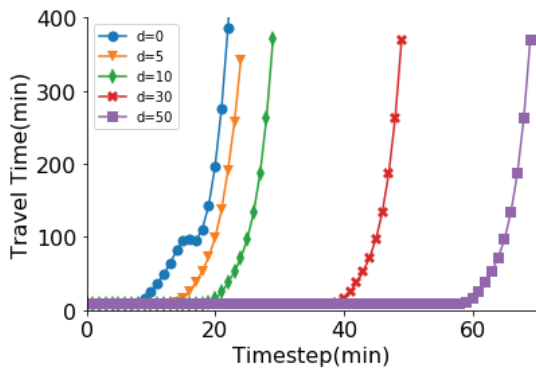


図-8 迂回経路旅行時間 T_b ($\theta = 1, M=0.8$)

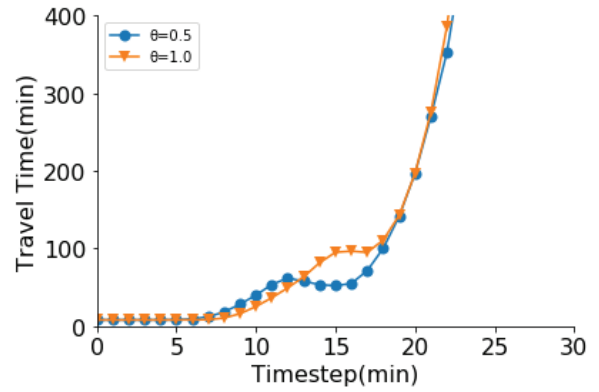


図-12 迂回経路旅行時間 T_b ($d=0, M=0.8$)

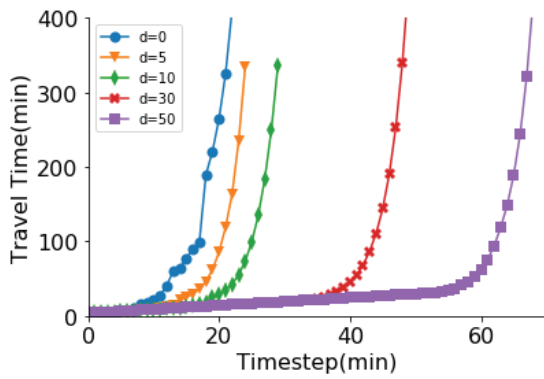


図-9 直進経路旅行時間 T_s ($\theta = 1, M=0.8$)

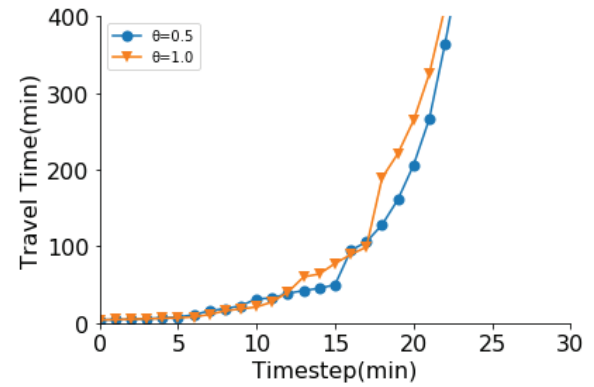


図-13 直進経路旅行時間 T_s ($d=0, M=0.8$)

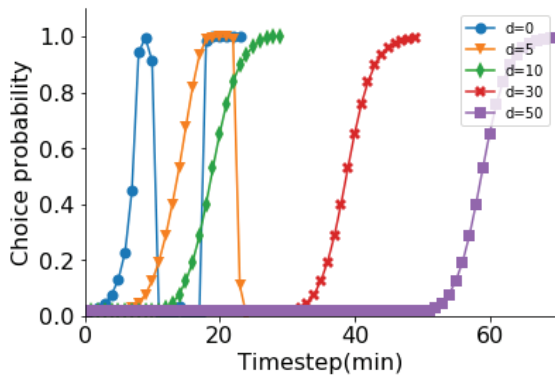


図-10 迂回経路選択確率 p_b ($\theta = 1, M=0.8$)

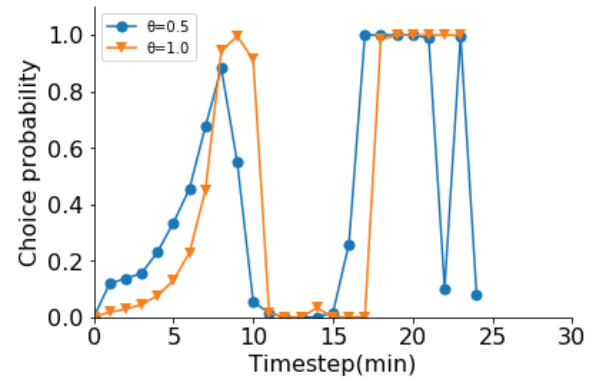


図-14 迂回経路選択確率 p_b ($d=0, M=0.8$)

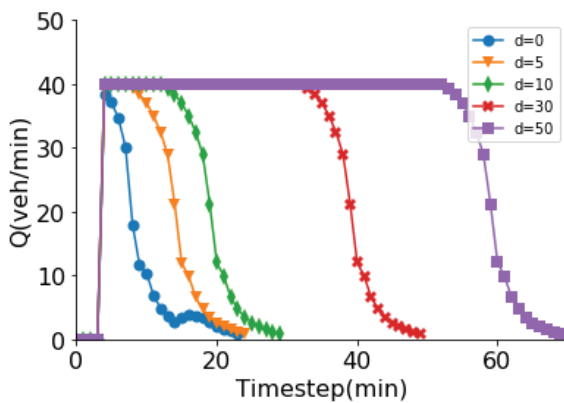


図-11 環 x からの流出量 Q ($\theta = 1, M=0.8$)

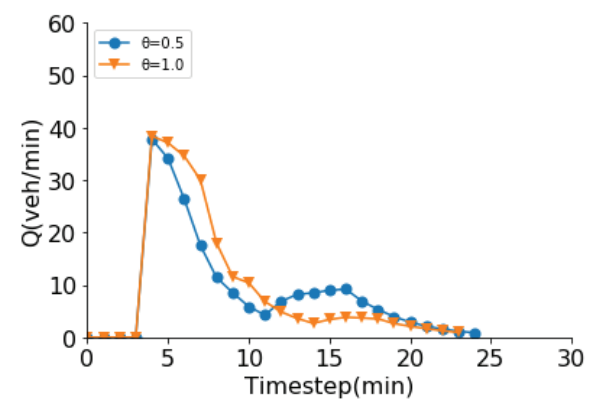


図-15 環 x からの流出量 Q ($d=0, M=0.8$)

ないかと考えられる。同様に待ち行列が延伸するのであれば、迂回路は迂回距離の分だけ旅行時間が大きくなるため、迂回路が選ばれにくくなるのではないだろうかと考えられる。 $M=0.8$ の時には、環内への流入が優先されるために、環内の x_2 , y_4 でそれぞれ渋滞が発生する。すると、迂回路に渋滞が延伸してしまうよりも先にそれぞれ流入口である O_x , O_y へと渋滞が延伸するために、直進路の方が旅行時間が長くなる瞬間が出てくる。そのために経路選択確率に振動が発生し、より多くの需要が一度に集中するようになるためネットワークはグリッドロックに向かうものと考えられる。

$M=0.8$ の時において、情報遅延 d が大きいほどグリッドロックの発生が遅くなるという結果が得られた。このことから、情報の遅延はグリッドロック発生を遅らせる効果を持つことが示唆された。この現象は以下のように解釈できるだろう。いま、混雑情報をドライバーに与えないと仮定すれば、ドライバーは迂回路の存在を知らないために全てのドライバーが直進路を選ぶことになる。その場合には異なる進行方向からの流入がないために、混雑は発生するものの、異なる起点を出発した車両が混じることがないために、グリッドロックには至らないと考えることができる。情報を与えないということは情報の遅延が無限大であると言い換えられるため、今回の d が大きいほどグリッドロック発生が遅れるという分析結果も同様の考え方で理解できる。よって、本研究の目的であった、情報伝播には必ずしもグリッドロック緩和に効果的ではなく、グリッドロック発生を引き起こす可能性をも持つという一例を本研究の結果から示すことができたと言えよう。

情報の感度については、 $\theta = 0.5, 1.0$ の時で多少の変化はあれども、どちらも最終的にはほぼ同じ結果に収束するという結果が得られた。このことから、情報の感度の差異は交通流に対して大きな影響を及ぼさない可能性が示唆された。

今後の課題としては、より一般的なネットワークに拡張して情報遅延がグリッドロックに与える影響を分析す

ることが挙げられよう。それにより、一般ネットワークでの情報伝播の影響をより明確にすることができるものと考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（基盤研究(S)「移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメント（課題番号 26220906）」、代表：桑原雅夫）の助成によりなされた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Iryo, T.: Day-to-day dynamical model incorporating an explicit description of individuals' information collection behaviour, *Transportation Research Part B*, Vol. 92, part A, pp. 88-103, 2016.
- 2) Daganzo, C. F.: The nature of freeway gridlock and how to prevent it, *Transportation and Traffic Theory*, 1996.
- 3) Daganzo, C. F.: Queue spillovers in transportation networks with a route choice, *Transportation Science* Vol. 32, No. 1, pp. 3-11, 1998.
- 4) 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘: 東日本大震災時の都区内道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 46, 2012.
- 5) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, No. 1, pp. 49-62, 2007.
- 6) Hani S. Mahmassani, Meead Saberi, Ali Zockaie K.: Urban Network Gridlock: Theory, Characteristics, and Dynamics, *Transportation Research Part C*, Vol. 36, pp. 480-497, 2013.
- 7) Iryo, T., Yamabe, K. and Asakura, Y.: Dynamics of information generation and transmissions through a social network in non-recurrent transport behaviour, *Transportation Research Part C*, Vol. 20, No.1, pp. 236-251, 2012.
- 8) 井料隆雅, 古田昌弥, 口井雅之, 桑原雅夫: 情報伝播の遅延が交通混雑に与える影響, *土木計画学研究発表会*, Vol. 55, 2017.
- 9) Daganzo, C. F.: The cell transmission model: a simple dynamic representation of highway traffic, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No. 4, pp. 269-287, 1994.
- 10) Daganzo, C. F.: The cell transmission model part II: network traffic. *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, pp.79-93, 1995.
- 11) 大島大輔, 大口敬: シングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の発生条件, *土木計画学研究・講演集*, Vol.48, 2013.

(2018. 4.28 受付)

EFFECT OF DELAY IN INFORMATION PROPAGATION ON GRIDLOCK OCCURRENCE

Yuki SAWAMURAO, Takamasa IRYO and Masao KUWAHARA

Information propagation on congestion is considered to be one of the factors that affects driver's route choice. In the static user equilibrium assignment problem, it has not been seriously considered as it is proved that it finally achieve equilibrium regardless of information propagation. However, under special congestion such as gridlock, there is a possibility that the outflow may suddenly decrease even with a slight change in demand. Therefore, in this research, we clarify the influence of information propagation on traffic congestion on networks with the possibility of gridlock. Specifically, we build a network of two routes with a structure

similar to a roundabout, and compare and analyze the traffic behaviors when the information propagation is delayed and when it is not. In order to evaluate queue elongation, traffic flow is expressed using CTM. As a result, we found that it is more difficult for gridlock to occur when there is a delay in information propagation.